

О Т З Ы В

официального оппонента на диссертацию Чопоровой Юлии Юрьевны
"ПРИМЕНЕНИЕ ПУЧКОВ МОНОХРОМАТИЧЕСКОГО ТЕРАГЕРЦОВОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ И СПЕКТРАЛЬНЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД",
представленную на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01
«приборы и методы экспериментальной физики»

Актуальность темы: Терагерцовый диапазон длительное время являлся практически недоступным для экспериментальных исследований, что связано с техническими сложностями создания источников достаточной мощности ТГц излучения и приёмников, обладающих требуемой чувствительностью. Эффективность большинства импульсных методов, основанных на оптико-терагерцовом преобразовании, в основном применяемых в качестве источников излучения этого диапазона, очень низкая ($\sim 10^{-4}$ – 10^{-5}). Традиционно средняя мощность импульсных генераторов терагерцового излучения составляет от нВт до мкВт. Кроме того, спектр излучения таких источников является широким, что принципиально отличает методы работы с ним от классических оптических методов исследования. Однако, в последнее время активно разрабатываются и создаются источники монохроматического излучения (квантовые каскадные лазеры и компактные лазеры на свободных электронах), что делает разработку методов исследования объектов, с использованием такого излучения актуальной задачей. В диссертационной работе Ю.Ю. Чопоровой в качестве источника излучения был использован Новосибирский лазер на свободных электронах (ЛСЭ). Параметры излучения ЛСЭ позволили реализовать классические методы оптического исследования в ТГц диапазоне: эллипсометрию и голографию. Активное развитие в последние годы получили исследования пучков с орбитальным угловым моментом (ОУМ); их генерация была продемонстрирована в оптическом и радио-диапазонах; их применение уже найдено в передаче данных, для управления частицами и для многих других. До данной работы пучки с ОУМ были сформированы только с помощью ТГц источников широкополосного излучения, в то время как для применения таких пучков, например, для исследования киральных сред отклик среды на монохроматическим излучением может принципиально отличаться от отклика на широкополосное воздействие. Таким образом, диссертационная работа Ю.Ю. Чопоровой, направленная на экспериментальную разработку нескольких методов исследования конденсированных сред: терагерцовой эллипсометрии, терагерцовой голографии и исследование сред с помощью пучков с орбитальным угловым моментом, является несомненно актуальной.

Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций: Проведенные в диссертации исследования базируются на использовании классических оптических методов исследования материалов и сред. Моделирование и численное восстановление голограмм базируется на скалярной теории дифракции и теории преобразования сигналов в оптических системах.

Новизна результатов: В диссертационной работе Ю.Ю. Чопоровой получен ряд

новых результатов, вносящих существенный вклад в развитие методов исследования материалов в различном агрегатном состоянии с помощью терагерцового монохроматического излучения. Предложен и реализован эллипсометрический метод измерения оптических параметров пленок и жидкостей с рекордной для терагерцового диапазона точностью определения комплексных показателей преломления как слоев, так и жидкостей. Реализован метод классической изображающей голографии с высоким пространственным разрешением. Впервые сформированы на терагерцовых частотах бесселевы пучки с орбитальным угловым моментом, экспериментально исследованы их свойства, а также с помощью бесселевых пучков были впервые сформированы поверхностные плазмон-поляритоны.

Достоверность полученных в работе результатов подтверждается совпадением результатов измерения, выполненных разными методами, с литературными данными, для случаев, когда они имеются; хорошим согласием результатов экспериментов с результатами численного моделирования.

Разработанные в диссертации программы для моделирования прохождения пучков терагерцового излучения через различные дифракционные структуры могут быть использованы при проектировании дифракционных элементов, что позволяет оценивать диссертационную работу как имеющую практическое применение.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, приложения и списка литературы из 148 наименований и изложена на 153 страницах.

Во **Введении** формулируется цель диссертации, обосновывается ее актуальность.

В **первой главе** Приведены характеристики излучения лазера на свободных электронах на рабочей станции пользователей. В качестве детекторов в диссертационной работе применялись детекторы ИК диапазона: пироэлектрический приемник, матричный микроболометрический приемник и термочувствительный люминесцентный экран. В главе приведены их основные характеристики, используемые в терагерцовом диапазоне.

Вторая глава посвящена измерению оптических характеристик различных слоев, а также жидкостей с помощью метода эллипсометрии. Описан принцип действия эллипсометра ТГц диапазона, работающего по схеме с вращающимся анализатором. На тестовом образце - кремниевом клине - автором была продемонстрирована рекордная для этого диапазона точность вычисления комплексного показателя преломления. Это позволило измерить характеристики пленок крови, находящихся на поверхности кремния. Применяя в эллипсометре блок нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО), автор измерил комплексные показатели преломления жидкостей.

Третья глава посвящена получению изображений объектов в терагерцовом диапазоне методами классической голографии. Запись голограмм была реализована с помощью двух приемников, впервые примененных для подобной задачи. Восстановление записанных голограмм было реализовано несколькими численными методами. Применение голографии автор демонстрирует на получении изображений в системах с НПВО с каплями на поверхности кремниевой призмы.

В **четвертой главе** рассмотрены возможности формирования в терагерцовом диапазоне частот пучков с орбитальным угловым моментом с помощью бинарной дифракционной кремниевой пластинки. Показано, что распределение интенсивности

сформированных пучков близко к бесселевой функции, что также подтверждается наличием у сформированных пучков самовосстановления и бездифракционности. Наличие орбитального углового момента было подтверждено дифракционными и интерференционными методами, которые могут быть использованы для определения величины и направления "закрученности" пучка с ОУМ.

С помощью пучков с ОУМ были сгенерированы поверхностные плазмон-поляритоны, используемые для исследования тонких слоев. В диссертационной работе были исследованы диэлектрические слои ZnS на поверхности золота. Отмечено, что эффективность генерации поверхностных плазмон-поляритонов зависит от направления закрученности пучка.

В **Заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы.

В **Приложении А** продемонстрирован расчет дифракционной эффективности четырехуровневой дифракционной линзы.

Достоинствами работы, в целом, считаю то, что в ней продемонстрирована вся цепочка от предлагаемого метода через техническую реализацию до практических результатов. Полученные результаты убедительно подтверждают перспективность предлагаемых методов и подходов для решения широкого круга задач в области терагерцовой эллипсометрии, видения и материаловедения.

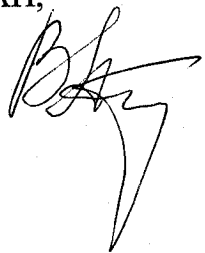
Замечания к диссертации заключаются в следующем:

1. Как известно, в эллипсометрии крайне важна обоснованность однозначности и точности результатов измерений. Для этого выполняется статистический анализ погрешностей используемой системы измерений в зависимости от неидеальности поляризационных элементов, шумов источника и приемника излучения, неточности определения углов и т.д.
Количество измерений, выполненных на разработанном эллипсометре, крайне мало, отсутствует статистика измерений, поэтому утверждать о точности и широкой применимости прибора несколько преждевременно. Желательно расширить диапазон длин волн, на которых проводятся измерения и набрать требуемое количество измерений.
2. Автор использует схему осевой голографии, хотя в оптическом диапазоне более распространена схема внеосевой голографии (например схема Лейта-Упатниекса). Выбор схемы не обоснован в диссертации.
3. При сравнении изображений, восстанавливаемых различными методами цифровой голографии, хотелось бы видеть количественную оценку эффективности используемых методов на основе какого-либо общепринятого критерия; например, частотно-контрастной характеристики.

Отмеченные недостатки не снижают достоинства работы. Полученные в ней результаты достаточно полно представлены в ведущих российских и международных научных журналах и доложены на конференциях высокого уровня. Автореферат и опубликованные материалы полностью соответствуют содержанию диссертации.

Считаю, что работа Ю.Ю. Чопоровой соответствует всем требованиям, предъявляемым ВАК к диссертационным работам, представляемым на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а соискатель заслуживает присуждения искомой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01.- «приборы и методы экспериментальной физики».

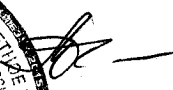
Старший научный сотрудник
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института автоматики и электрометрии СО РАН,
кандидат физико-математических наук



В.Д. Анцыгин

Подпись В.Д. Анцыгина заверяю

Ученый секретарь Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Института автоматики и электрометрии СО РАН
Доктор технических наук



С.В. Михляев